

Evaluación numérico-experimental del comportamiento histérico del coeficiente de rugosidad de los macrófitos

Numerical-experimental assessment of the hysterical behaviour of the macrophytes roughness coefficient

Sanz-Ramos, M.^{a1}, Bladé, E.^{a2}, Niñerola, D.^{a3}, Palau-Ibars, A.^b

^aInstitut Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya. C/ Jordi Girona 1-3 08034 Barcelona, España.
E-mail: ^{a1}marcos.sanz-ramos@upc.edu, ^{a2}ernest.blade@upc.edu, ^{a3}daniel.ninyerola@upc.edu

^bETSEA. Universitat de Lleida. Av. A. Rovira Roure, 191. 25198-Lleida. España.
E-mail: apalau@macs.udl.cat

Recibido: 31/10/2017

Aceptado: 08/02/2018

Publicado: 31/07/2018

Citar como: Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Niñerola, D., Palau-Ibars, A. 2018. Numerical-experimental assessment of the hysterical behaviour of the macrophytes roughness coefficient. *Ingeniería del agua*, 22(3), 109-124. <https://doi.org/10.4995/la.2018.8880>

RESUMEN

La problemática asociada al crecimiento masivo de macrófitos en el Bajo Ebro ha llevado a autoridades y gestores a examinar la posibilidad de paliar los efectos negativos que producen sobre el sistema hídrico, y los usos del agua, mediante la realización de avenidas controladas periódicas que provoquen su remoción. El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento hidráulico de los macrófitos mediante simulación numérica (modelo Iber) y su comparación con datos de campo, con el fin de explorar las mejores opciones posibles para diseñar avenidas controladas más eficaces. Para ello se han empleado diferentes relaciones entre el coeficiente de rugosidad y la altura de agua bajo tres enfoques distintos (constante, variable y variable con histéresis) a fin de calibrar el modelo numérico con los datos de campo. Se ha podido observar que el mejor ajuste se produce cuando dichas curvas son de tipo variable con histéresis (diferente rama de subida que de bajada).

Palabras clave | macrófitos; coeficiente de rugosidad variable; avenidas controladas; simulación hidráulica.

ABSTRACT

The associated problems with the massive growth of macrophytes in the Lower Ebro, has led authorities and managers to explore the possibilities to minimize their negative effects on the water ecosystem and associated water uses by removing them by means of controlled floods. The main goal of the present work is to evaluate the hydraulic behaviour of the macrophytes through numerical simulation (Iber model) and its comparison with field data, in order to design the most efficient flushing flows. For this purpose, roughness coefficient – water depth relations (constant, variable and variable with hysteresis) were used to calibrate the numerical model with field data. It was observed that the best fit occurred the variable type with hysteresis curves (different ascent and descent branches) were used.

Key words | macrophytes; variable roughness coefficient; controlled floods; hydraulic simulation.

INTRODUCCIÓN

El curso fluvial del Bajo Ebro (España) ha experimentado en las últimas décadas un incremento muy importante de vegetación acuática, tanto de macrófitos acuáticos enraizados sumergidos como emergidos y flotantes (CHE, 2008; CHE, 2010). Los macrófitos se han utilizado como indicadores de la calidad del agua a medio y largo plazo puesto que son sensibles a las características físico-químicas de las masas de agua, si bien su cantidad y extensión es también sensible a las características hidromorfológicas de los cursos fluviales (Green, 2005b).

En el caso del Bajo Ebro, la proliferación masiva de este tipo de vegetación acuática está asociada a varios factores a la vez, entre los que no resulta fácil asignar responsabilidades. Así, la mejora en la calidad del agua en la cuenca como consecuencia de la depuración de aguas residuales urbanas, que antaño se vertían directamente al río, ha aumentado la disponibilidad de nutrientes inorgánicos disueltos debido al tipo de tratamiento de depuración (CHE, 2010), lo que ha redundado directamente en la proliferación de macrófitos (Carr *et al.*, 1997). Por otro lado, la presencia y los cambios en la gestión del sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix también han jugado un papel relevante (CHE, 2010), clarificando el agua y favoreciendo la penetración de la luz hasta el lecho, así como laminando avenidas (Palau *et al.*, 2004; Vericat y Batalla, 2004).

La presencia de macrófitos en las masas de agua, y concretamente en los ríos, puede tener consecuencias negativas: i) en el ecosistema acuático donde provocan un desequilibrio en la estructura trófica, comprometiendo o alterando el crecimiento de otras especies (Carr *et al.*, 1997; Anderson, 2003) y que puede favorecer la aparición de plagas, como la mosca negra (Batalla y Vericat, 2009); ii) en la actividad económica asociada a los usos del agua ya que puede dejar inoperativos sistemas de riego, infraestructuras hidráulicas (captaciones, azudes, centrales eléctricas, etc.), zonas de navegación, etc. (Anderson, 2003); y iii) en el comportamiento hidráulico del río (incremento del calado, reducción de la velocidad, incremento de procesos de sedimentación de partículas en suspensión, etc.), aumentando el riesgo de inundación por desbordamiento y el área afectada en caso de avenida (Prats *et al.*, 2009), de manera que, para un mismo tramo de río, con o sin macrófitos, la capacidad de desagüe puede llegar a ser muy distinta en función de la cantidad (biomasa), época del año y distribución espacial de este tipo de vegetación acuática.

A raíz de esta problemática, desde 2002 se llevan a cabo avenidas controladas desde los embalses de Ribarroja y Flix con el fin erradicar, o como mínimo controlar, la población de macrófitos en el Bajo Ebro. La efectividad de estas avenidas depende, en gran medida, de las características de sus hidrogramas (caudal/es pico/s, duración y volumen) y de la resistencia al flujo que ejerce la vegetación de ribera. Estas avenidas requieren de un gran volumen de agua, por lo que su aplicación, dentro de un año hidrológico, no es frecuente (una o dos veces al año).

Con el fin de optimizar los recursos hídricos, la simulación numérica se postula como una herramienta eficiente y eficaz, al permitir llevar a cabo evaluaciones de diferentes hidrogramas y poder así conocer, de antemano, el comportamiento hidráulico del río, detectar posibles aspectos a mejorar y, finalmente, diseñar avenidas controladas que se ajusten a las necesidades del tramo de estudio. El complejo comportamiento hidráulico de los macrófitos (resistencia al flujo), con un claro carácter hidrodinámico al flujo (menor resistencia a mayor caudal), dificulta la realización de este tipo de análisis si no se dispone de datos fiables que garanticen su correcta caracterización.

En este aspecto son numerosos los estudios que han analizado el comportamiento hidráulico de la vegetación asociada a los ecosistemas fluviales, y concretamente a los macrófitos (Järvelä, 2002; Järvelä, 2005; Green, 2006; Niroka *et al.*, 2008; Hui y Hu, 2010; entre otros). En su mayoría se centran en la evaluación de las fuerzas de arrastre (*drag*) o coeficientes de rugosidad (coeficiente de Manning) obtenidas a partir de ensayos de laboratorio bajo situaciones controladas y caudales constantes. Sin embargo no se ha profundizado en el estudio de situaciones más complejas, p. ej. bajo caudal variable y/o con interacción con otras especies vegetales o usos del suelo.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar el proceso de calibración del modelo numérico, en el que se ajustaron los valores del coeficiente de rugosidad para las especies de macrófitos presentes en el tramo del río Ebro aguas abajo de la presa de Flix. Se analizó el comportamiento hidráulico del sistema bajo rugosidad constante y variable frente al calado y, además, se estudió la adecuación de coeficientes de rugosidad variable mediante diferentes curvas rugosidad-calado para la rama de subida y de bajada (histéresis).

Con el fin de caracterizar adecuadamente el comportamiento hidráulico de los macrófitos, ha sido necesario disponer de información de campo que permitiera determinar el rango de valores en los que oscila la resistencia al flujo de los mismos. Para ello se realizó una campaña de campo el día 21 de abril de 2016, en el tramo comprendido entre la Presa de Flix y el azud de la Central Nuclear de Ascó, aprovechando la avenida controlada de primavera de ese año. Durante dicho evento se instalaron sensores de presión en diferentes puntos del tramo con la finalidad de medir la evolución del calado, y de este modo calibrar el modelo numérico.

ÁREA DE ESTUDIO

El río Ebro drena las aguas de gran parte del noreste de la Península Ibérica. La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) tiene inventariadas 135 presas y embalses de más de 1 hm³ con una capacidad de aproximadamente 8000 hm³ (CHE, 2015). Los recursos hídricos evaluados para el periodo 1980-2006 muestran que la cuenca del río Ebro dispone de alrededor de 14600 hm³/año (de los cuales 5600 hm³ se asocian a flujo subterráneo), cosa que le confiere una regulación entorno al 48% (CHE, 2015).

El caso de estudio se centra en la parte baja del río Ebro (Figura 1), en el tramo comprendido entre la Presa de Flix (PF) y el azud de captación de agua para el sistema de refrigeración de la Central Nuclear de Ascó (CNA).

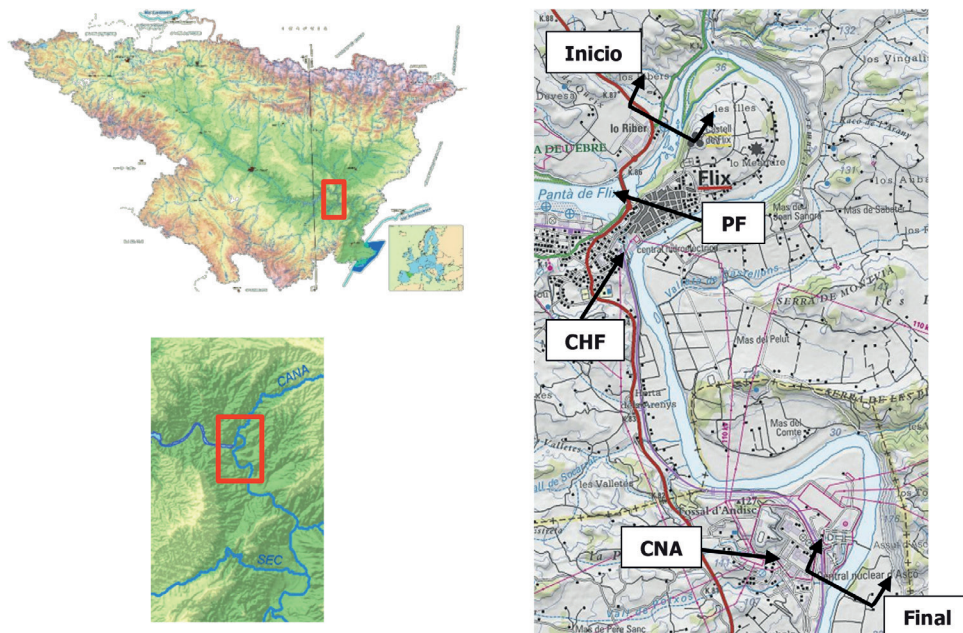


Figura 1 | Tramo de estudio. Inicio situado aguas abajo de la Presa de Flix (PF) y final aguas abajo del azud de la Central Nuclear de Ascó (CNA). Fuente: ICGC y CHE.

Se trata de un tramo de río de aproximadamente 10 km de longitud que se encuentra encajado en el valle fluvial (Figura 1), por lo que se requieren caudales elevados para que el agua inunde las llanuras adyacentes. Tiene un comportamiento similar al de un canal, con pequeñas peculiaridades como islas y barras con vegetación. La entrada de agua tiene lugar desde la presa de Flix (caudal ecológico y desembalses) y al final del primer tercio del tramo, por donde se vierten los caudales turbinados por la Central Hidroeléctrica de Flix (CHF). Existe una captación de agua importante, mediante una pequeña obra hidráulica (azud) situada al final del tramo, en las cercanías de la CNA, para la refrigeración de dicha instalación.

La proliferación de macrófitos es muy extensa en todo el tramo de estudio, llegando a cubrir secciones completas desde la PF hasta el Pas de Barca (en la localidad de Flix). El nivel de agua en este primer tramo se mantiene casi constante gracias al remonte de las aguas turbinadas desde la CHF (situada aguas abajo) y el caudal liberado desde la PF.

MACRÓFITOS

Los macrófitos son un tipo de vegetación acuática vascular que puede tener toda su estructura sumergida, semisumergida o flotante (Figura 2). Los enraizados en el lecho se encuentran a una profundidad variable y con grado de fijación distinto en función de la especie, de su estado de desarrollo, del tipo de sustrato y de las condiciones hidráulicas locales. Las especies de macrófitos enraizadas en el tramo de estudio son, principalmente, cuatro: *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton natans* y *Ceratophyllum demersum*.

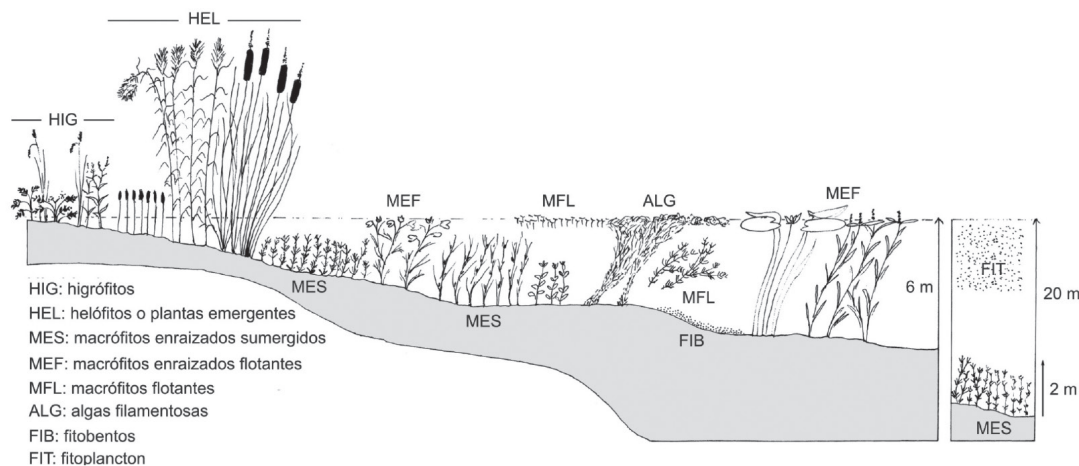


Figura 2 | Esquema de flora acuática (macrófitos). Fuente: Cirujano *et al.*, 2011.

Aunque cada especie tiene un comportamiento hidrodinámico diferente, las comunidades de macrófitos que se encuentran bien asentadas, como en este tramo de estudio, en general tienden a ralentizar el flujo, y como consecuencia a incrementar el nivel del agua (Dawson y Robinson, 1984; Beger y Wells, 2008; Prats *et al.*, 2009). Este tipo de plantas se adapta a las condiciones hidrodinámicas del flujo gracias a su morfología, formando tallos alargados (Järvelä, 2002; Stephan y Gutknecht, 2002; Nikora, 2008; entre otros). En aguas tranquilas se disponen en vertical, ocupando mayor volumen, mientras que en aguas rápidas lo hacen en horizontal (Figura 3). Además, cuando los niveles y velocidades del agua son elevados, se produce un fenómeno de “aplastamiento” de la vegetación que provoca un incremento de la capacidad de desagüe, ya que se incrementa la velocidad cerca de la superficie (Järvelä, 2002; Järvelä, 2005).

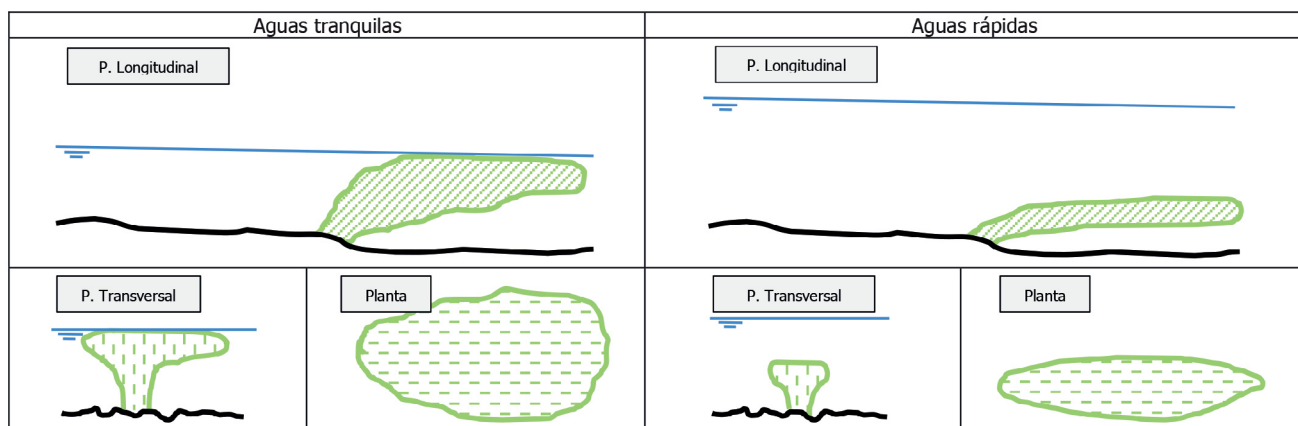


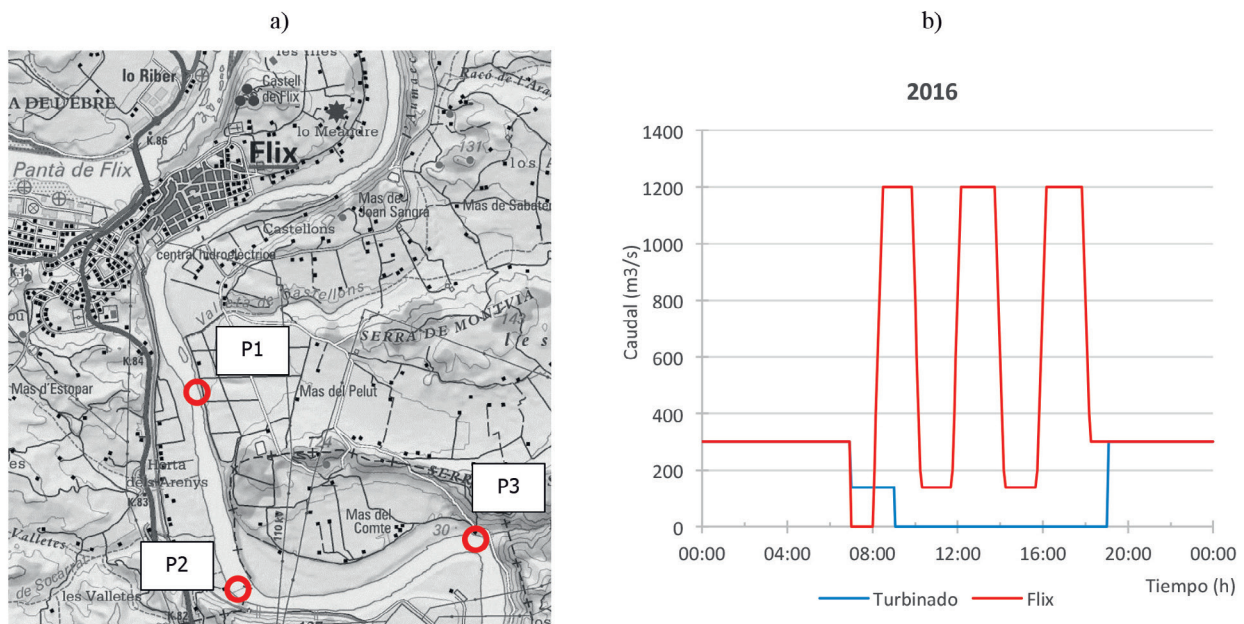
Figura 3 | Representación esquemática (sección, planta y alzado) del comportamiento hidráulico de los macrófitos en aguas tranquilas (izq.) y aguas rápidas (dcha.).

Con el fin de conocer adecuadamente la problemática de los macrófitos en el Bajo Ebro, la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), entre otras entidades, ha llevado a cabo diversos estudios para la determinación y cartografía de las formaciones de macrófitos mediante campañas de campo. En ellos, empleando diferentes técnicas ha sido posible conocer la ubicación y tipología de los macrófitos (clasificados como emergidos, semisumergidos y sumergidos). Estos estudios han sido la base para la creación de mapas de distribución espacial de macrófitos en la zona de estudio (CHE, 2008; CHE, 2010; Montesinos *et al.*, 2009; entre otros). Este organismo de cuenca (CHE) ha llevado a cabo también estudios multidisciplinarios para analizar las causas de la proliferación de los macrófitos, diagnosticar la situación y plantear posibles medidas de gestión (CHE, 2010).

CAMPAÑA DE CAMPO

Se llevaron a cabo dos campañas de campo. La primera campaña (octubre de 2015) tuvo como objetivo caracterizar el lecho y conocer la ubicación y topología de los macrófitos (ENDESA, 2016), así como su comportamiento hidráulico mediante perfiles de velocidad.

En la segunda campaña, llevada a cabo los días 20 y 21 de abril de 2016, se estudiaron los efectos de la avenida controlada realizada (Figura 4b). Ambas campañas sirvieron para la calibración del modelo numérico. Los trabajos de campo consistieron en la toma de datos de altura de agua mediante sensores *HOBBO Water Level Logger* (modelo U20-001-04, de 0 a 9 m, ± 1.4 mm). La ubicación de puntos de medida (Figura 4a) vino motivada por razones hidráulicas, buscando puntos singulares en tramos rectos y curvos, con presencia de macrófitos, y suficientemente alejados entre sí para ver diferencias en la propagación de la avenida.



Avenida controlada

El hidrograma diseñado (Figura 4b) se compuso por dos puntos de vertido: la Presa de Flix (PF, en rojo) y la Central Hidroeléctrica de Flix (CHF, en azul). El hidrograma vertido desde la PF se diseñó para que el caudal no superase los 1200 m³/s (caudales superiores provocan riesgo de inundación por la anegación de zonas ribereñas) y tuviesen más de un pico a fin de obtener, en la misma campaña, más de un dato y eliminar así incertidumbres en la medida. Se tuvo en cuenta, también, el régimen de caudales turbinados desde la CHF, ubicada después del meandro de Flix (4 km aguas abajo del inicio del tramo de estudio), ya que hasta el inicio de la avenida controlada se estuvieron turbinando caudales de relativa importancia (300 m³/s), y durante la misma se detuvo la producción de energía eléctrica para no interferir en los resultados e incrementar la eficiencia de la avenida (Figura 5).

Tratamiento de los datos

Los sensores *HOBO* empleados ofrecen la presión absoluta (P_{ab}) con capacidad de medida de hasta 9 m de profundidad (± 1.4 mm). Para la obtención del nivel de agua en los puntos de control fue necesario determinar la presión manométrica o relativa (P_m). Puesto que ambas variables se relacionan por $P_{ab} = P_{atm} + P_m$, siendo P_{atm} constante y de valor 1013 hPa durante la campaña de campo, la obtención de altura de agua fue directa. La frecuencia de registro de los sensores fue de un minuto.



Figura 5 | Inicio del tramo de estudio (meandro de Flix). Comparativa entre dos caudales distintos.

Así pues, los datos de altura de agua obtenidos tan solo son función de la columna de agua situada encima del sensor. Puesto que los sensores se instalaron a profundidades diferentes, para homogeneizar los resultados se consideró como “cero”, en cada una de las series de datos, la profundidad de agua a las 01:00 h del día 21 de abril. Para ese instante el caudal circulante fue constante y conocido (600 m³/s), de modo que el nivel de agua también fue constante. De este modo resulta inmediato obtener la profundidad relativa de la lámina de agua y emplearla para comparar los resultados con el modelo numérico.

MODELO NUMÉRICO

Con el fin de analizar el comportamiento hidráulico del tramo de estudio y realizar la calibración del coeficiente de rugosidad de los macrófitos, se empleó la herramienta de modelización hidráulica bidimensional de flujo de agua en régimen variable Iber (Bladé *et al.*, 2014a; Bladé *et al.*, 2014b).

Iber permite considerar coeficientes de rugosidad variables en el espacio y en el tiempo (en función de las características del flujo) en los elementos de la malla de cálculo. Por esta razón se consideró que el modelo Iber era la herramienta adecuada para

conseguir una descripción detallada del flujo en el tramo de río y poder caracterizar el comportamiento hidráulico de los macrófitos frente a situaciones de caudal cambiante (avenidas controladas).

Batimetría y malla de cálculo

Los datos de elevación empleados en el modelo numérico se basan en un modelo digital del terreno tipo raster de tamaño de celda 4×4 m obtenido a partir de secciones transversales interpoladas mediante una TIN (*Triangulated Irregular Network*). Estas secciones, un total de 53 tomadas con una separación entre 100 y 300 m, se obtuvieron en julio de 2009 para la evaluación de los efectos geomorfológicos del río Ebro en el mismo tramo a estudio (Tena *et al.*, 2013), y que ha sido facilitada para este estudio (Figura 6c).

La información topográfica fue modificada a fin de representar adecuadamente el cauce en base a los datos obtenidos en la primera campaña de campo. En total se rectificaron 13 zonas mediante superficies poligonales 3D convertidas posteriormente a raster. Se corrigieron islas mal definidas y recién formadas, sendos márgenes donde no se ajustaba el modelo batimétrico al topográfico (fuera de los márgenes), la salida de la CHF, el azud y la toma de la CNA.

Para la realización del estudio se utilizó el módulo hidrodinámico de Iber considerando el fondo fijo (sin transporte de sedimentos) atendiendo al bajo impacto geomorfológico de las avenidas controladas (Tena *et al.*, 2013). Asimismo, se empleó una malla de cálculo de elementos cuadriláteros de 4×4 metros de lado, con alrededor de 140000 elementos (Figuras 6a y 6b).

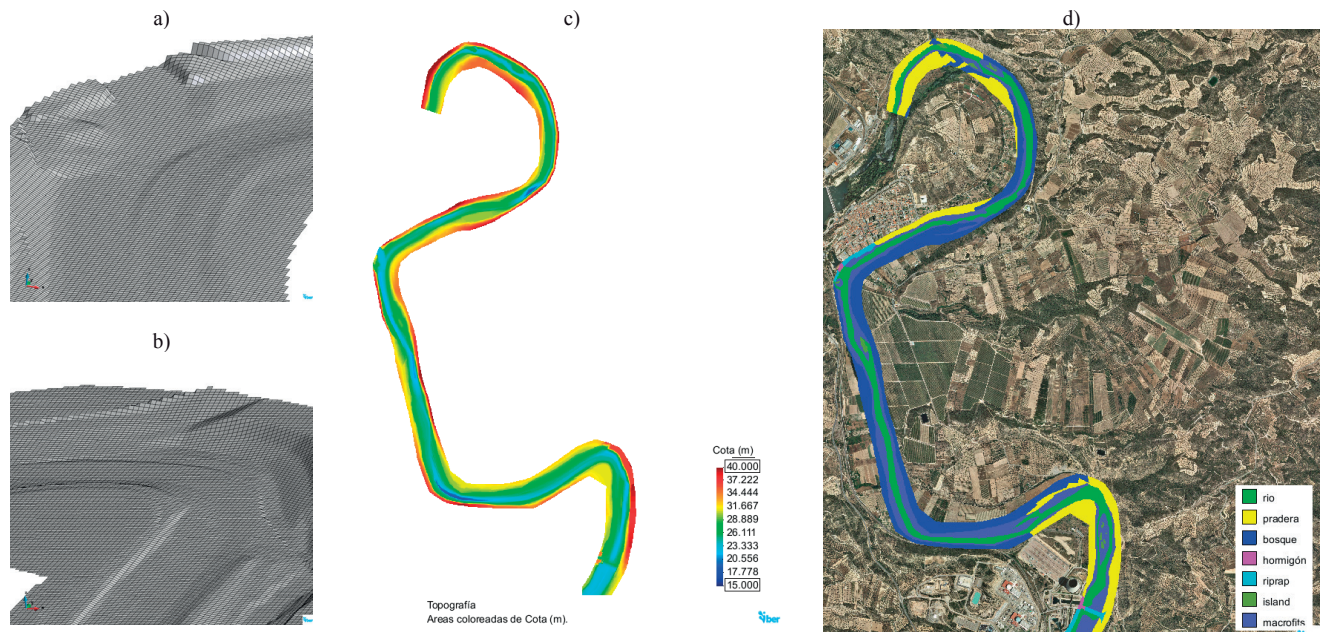


Figura 6 | Representación de la malla de cálculo empleada (a y b), topografía de la zona de estudio (c) y mapa de usos del suelo (d).

Caracterización del coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad o de Manning es uno de los parámetros más importantes para la adecuada caracterización hidráulica de un curso fluvial, sobre todo en aquellos ríos donde su distribución espacial es muy cambiante a lo largo de la sección. Prats *et al.* (2009) demostraron que existe una relación entre el comportamiento hidráulico del río Ebro y la presencia de macrófitos, dándose dos patrones distintos en función de la resistencia al flujo que ejerce la vegetación acuática en el Bajo Ebro.

Diversos autores han caracterizado el comportamiento hidrodinámico de la vegetación de ribera, y concretamente de los macrófitos. Dawson y Robinson (1984) lo analizaron en términos de resistencia al flujo (tensiones), así como las formas en planta y alzado, en función del flujo circulante. Mediante estudios de laboratorio, Stephan y Gutknecht (2002) evaluaron la resistencia al flujo en toda la columna de agua, formulando una nueva ecuación que permitiese determinar el perfil de velocidades por encima de diferentes especies de macrófitos. Nikora *et al.* (2008) emplearon medidas de campo para determinar diferentes relaciones entre la resistencia al flujo y los parámetros físicos de las plantas. Green (2005a) hace mención al efecto bloqueo que ejerce la vegetación en una sección del cauce. Asimismo, se demuestra el efecto hidrodinámico de la vegetación a medida que se incrementa el flujo, aunque esta tendencia es muy variable según el tipo de especie y condiciones hidráulicas (Järvelä, 2002; Nikora *et al.*, 2008). En este aspecto Fathi-Moghadam *et al.* (2011), Fathi-Moghadam y Drikvandi (2012) y Green (2005b), entre otros, observaron que existe una relación no-lineal entre la resistencia al flujo de la vegetación y las características del flujo (velocidad, calado, ancho, etc.), aplicable también a macrófitos (Dawson y Robinson, 1984). Todos estos trabajos han sido realizados en canales de laboratorio, bajo condiciones controladas, o en ríos cuyas características difieren mucho de la parte baja del río Ebro (alta regulación, caudales moderados y muy homogéneos, diferente sustrato y especies de macrófitos, etc.).

Más recientemente, Tena *et al.* (2013) estudiaron y determinaron el coeficiente de fricción de los macrófitos en el mismo tramo de río a partir de la interpretación del valor NDVI (Índice Normalizado de Diferencias de Vegetación, en sus siglas en inglés). Esta metodología sirvió como aproximación para la obtención del coeficiente de rugosidad, pero se encuentra limitada a macrófitos cercanos a la superficie del agua (prácticamente solo los emergidos). Además, estos valores también dependen de diversos factores como la época del año, nivel de desarrollo, etc.

Todos estos estudios muestran una alta variabilidad en el coeficiente de Manning de los macrófitos ($0.027\text{--}0.556\text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$) en función, no solo de la especie, sino también del flujo circulante. Sin embargo de ellos se desprende que los macrófitos se comportan como vegetación flexible, variando su resistencia al flujo en función de los niveles de agua y velocidad. Es decir, a medida que se incrementa el caudal, se reduce la resistencia al flujo de los macrófitos por el aplastamiento de los mismos, lo que provoca el incremento del flujo por encima (mayor descarga). Por tanto, para la correcta caracterización del comportamiento hidrodinámico de los macrófitos es necesario emplear un coeficiente de rugosidad variable evitando caer en la asignación de un único valor para todo el tramo de cauce, en una misma la sección y/o en la columna de agua en la que se sitúa el macrófito (Fathi-Moghadam y Drikvandi, 2012).

La distribución espacial del tipo de macrófitos resultó compleja debido a la convivencia de diversas especies en un mismo punto (ENDESA, 2016), siendo necesaria la caracterización de cada especie. Por ello se asumió que las cuatro especies de macrófitos enraizadas en el tramo de río se comportan hidrodinámicamente igual. Para la creación de un mapa de usos del suelo espacialmente distribuido se emplearon técnicas de fotointerpretación (mapas de macrófitos procedentes del “Vuelo de fotografía aérea de muy alta resolución para la generación de mapas de macrófitos”) y el factor NVDI de los trabajos de la CHE (CHE, 2010; Montesinos *et al.*, 2009) para obtener la distribución espacial al menos en superficie. Ello permitió la caracterización de la zona de estudio mediante el mapa de usos del suelo que se muestra en la Figura 6d.

Tabla 1 | Coeficiente de Manning de los diferentes usos del suelo empleados en el modelo numérico. En el caso de los macrófitos se emplea un rango de valores en función de las características hidráulicas del flujo.

Uso del suelo	Coeficiente de Manning ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1/3}$)
bosque	0.060
islas	0.055
río	0.025
hormigón	0.018
pradera	0.035
macrófitos	0.028-0.050
escollera	0.045

Los valores del coeficiente de Manning para todos los usos del suelo del tramo de estudio, excepto los macrófitos y el río, se obtuvieron de las recomendaciones de Barnes (1987) y Arcement y Schneider (1989) que se muestran en la Tabla 1. Se empleó un valor del coeficiente de rugosidad del río dentro del rango propuesto por Tena *et al.* (2013), obtenido en las secciones sin presencia

de macrófitos mediante la fórmula de Manning (Ecuación 1). Para el rango de valores específico de los macrófitos se utilizaron los valores de referencia de las publicaciones anteriormente citadas, particularizando para la tipología de río objeto de estudio y asumiendo que las cuatro especies representadas en el tramo de estudio se comportan hidráulicamente de manera homóloga.

Varios de los trabajos mencionados introducen el concepto de la turbulencia y los efectos tridimensionales en la resistencia al flujo de los macrófitos (Green, 2005a; Nikora *et al.*, 2008). Debido a las simplificaciones matemáticas propias del modelo numérico seleccionado (2D, donde no existe componente ascensional de la velocidad), para toda la columna de agua se emplea un único coeficiente de rugosidad, es decir, no se tienen en cuenta los remolinos turbulentos en la vertical y se simplifica el gradiente de la resistencia al flujo en la vertical a un único valor en toda la columna de agua.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

El efecto de la rugosidad variable puede ser tenido en cuenta en Iber mediante la relación q - n o h - n (siendo q el caudal específico, h el calado y n el coeficiente de Manning). Fue a través de este último como se evaluó dicha relación para tener en cuenta la deformación que sufre la planta a medida que se incrementa el caudal, reduciéndose la resistencia al flujo y favoreciendo al incremento de la capacidad de desagüe.

En el modelo bidimensional la tensión que ejerce el fondo (τ_b) sobre la masa de agua se descompone en las dos direcciones espaciales (X e Y). Ésta se evalúa mediante la fórmula de Manning que, a su vez, tiene como parámetro principal el coeficiente de Manning (Ecuación 1):

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 |U| U_x}{h^{4/3}} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 |U| U_y}{h^{4/3}} \quad (1)$$

siendo ρ la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad, U_x y U_y las dos componentes de la velocidad (siendo $|U|$ su módulo), n el coeficiente de Manning y h el calado.

El proceso de calibración consistió de dos fases: la primera para obtener el hidrograma realmente ejecutado y la segunda para ajustar el coeficiente de rugosidad de los macrófitos. En la segunda fase se ajustó, en primer término, el modelo numérico en los picos y valles, y posteriormente en las ramas de subida y bajada entre aguas altas y bajas. De este modo se ajustaron primero los valores máximo y mínimo del coeficiente de rugosidad a fin de reproducir adecuadamente el fenómeno de “aplastamiento” de la vegetación. Seguidamente se diseñaron curvas para los tramos intermedios.

Primera fase. Hidrogramas

La avenida controlada diseñada (Figura 4b) se caracterizó por tener tres picos de 1200 m³/s y tres valles de 160 m³/s, con una duración de aproximadamente 1.5 h, y un rápido incremento/decremento de caudal (200 m³/s cada 5 min). Según lo que se pudo observar durante la segunda campaña de campo, y que se contrastó posteriormente con los datos experimentales, existieron ligeras diferencias entre el hidrograma de la avenida controlada diseñada y el realmente ejecutado. Estas diferencias pudieron estar asociadas a los tiempos de operatividad de las compuertas de la Presa de Flix (PF) y el desajuste espacio-temporal en el frente de avenida proveniente de la Presa de Ribarroja (PR), cuyo embalse tiene la capacidad suficiente para evacuar la cantidad de agua necesaria para las avenidas controladas.

Para obtener el hidrograma realmente ejecutado se realizó un ajuste *ad hoc* considerando el punto P3 (Figura 4a) como punto de control. Dada su ubicación, cercana al azud de la CNA, le confería un régimen hidráulico menos sensible a variaciones de caudal (régimen cercano al crítico). Se estudiaron 10 tipologías de hidrogramas en los que se modificó el caudal turbinado desde la CHF, los caudales mínimos y máximos vertidos desde la PF y la duración de los mismos. En total se realizaron 50 simulaciones, cuyo resultado final se muestra en la Figura 7. Se estimó que el caudal punta fue creciente en los picos y que hubo un pequeño desfase en la bajada en los primeros instantes del caudal desde la PF, así como un ligero vertido en ese periodo (de 07:00 a 09:00 h).

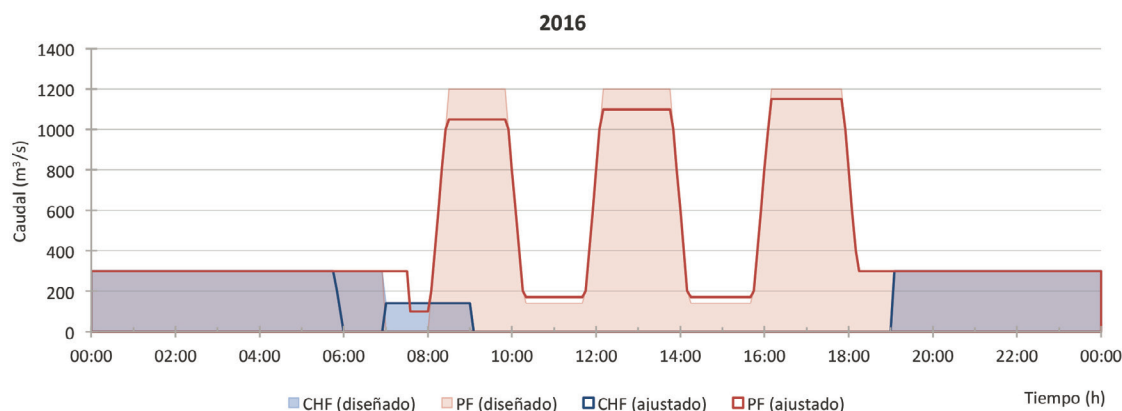


Figura 7 | Hidrograma ajustado de la avenida ejecutada. En rojo el caudal vertido desde la PF y en azul el caudal turbinado desde la CHF. En color degradado se muestran los hidrogramas diseñados y las líneas muestran los caudales ajustados.

Segunda fase. Coeficiente de rugosidad

Los trabajos de Dawson y Robinson (1984), Wu *et al.* (1999) y Nikora *et al.* (2008) demostraron la existencia de una relación no-lineal entre los parámetros hidráulicos y las características físicas de los macrófitos. Asimismo, Fathi-Moghadam y Drikvandi (2012) enfatizan la importancia de considerar valores de rugosidad variables, tanto en el tiempo como en el espacio, para obtener una adecuada simulación mediante modelos numéricos. Para el presente trabajo se diseñaron curvas rugosidad-calado variables a fin y efecto de obtener la mejor semejanza entre la simulación numérica y los datos de campo.

Tabla 2 | Hipótesis de cálculo y distintas ecuaciones empleadas para la caracterización del coeficiente de rugosidad de los macrófitos según las curvas tipo M.

Clave	Tipología	Ecuación [s·m ^{-1/3}]	S1			S2			S3		
			α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
M1	Constante	$n = \alpha$	0.0400	-	-	0.0450	-	-	0.0500	-	-
M2	Lineal	$n = \alpha \cdot h + \beta$	0.0009	0.0454	-	0.0012	0.0455	-	0.0015	0.0508	-
M3	Potencial	$n = \alpha \cdot h^\beta$	0.0420	0.1000	-	0.0410	0.1400	-	0.0440	0.1700	-
M4	Exponencial 1	$n = \alpha \cdot (1 + \gamma \cdot e^{-\beta \cdot h})$	0.0320	0.5000	0.5100	0.0280	0.4000	0.7500	0.0280	0.3000	0.9000
M5	Exponencial 2	$n = \alpha \cdot (1 + \gamma \cdot e^{-\beta \cdot h})$	0.0320	2.9000	1.7500	0.0280	1.0000	1.0000	0.0280	1.0000	1.3000

Para la calibración del coeficiente de rugosidad de los macrófitos se realizaron diferentes hipótesis: valor constante de n , valor variable (curva h - n) y valor variable con histéresis (curva h - n con una rama ascendente diferente a la descendente). La distribución espacial de los macrófitos, así como para el resto de elementos, se consideró invariante dado que se trata de un evento puntual.

El rango de valores de la rugosidad de referencia se engloba dentro de lo descrito por Tena *et al.* (2013), y dentro de la bibliografía de referencia (Barnes, 1987; Arcement y Schneider, 1989). Para la vegetación de ribera se emplearon valores de 0.035 a 0.06 s·m^{-1/3}, para el río de 0.025 s·m^{-1/3} y para los macrófitos un valor que oscila entre 0.028 y 0.050 s·m^{-1/3}. Este último es ligeramente inferior, sobre todo por la parte baja, atendiendo a que gran parte de los macrófitos quedan completamente sumergidos durante los periodos de aguas altas, de modo que se estaría sobreestimando su efecto.

Tabla 3 | Hipótesis de cálculo para la caracterización del coeficiente de rugosidad ($s \cdot m^{-1/3}$) de los macrófitos según las curvas tipo C y H. Las flechas arriba (\uparrow) y abajo (\downarrow) hacen referencia a la rama de incremento y decremento de calado de la curva de histéresis respectivamente.

h (m)	C1				C2				H-S1		H-S2	
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	n \uparrow	n \downarrow	n \uparrow	n \downarrow
0.5	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
1.0	0.0495	0.0495	0.0490	0.0485	0.0495	0.0495	0.0490	0.0485	0.0485	0.0497	0.0485	0.0499
2.0	0.0490	0.0485	0.0480	0.0470	0.0490	0.0485	0.0480	0.0470	0.0470	0.0490	0.0450	0.0495
3.0	0.0485	0.0475	0.0465	0.0430	0.0485	0.0475	0.0465	0.0430	0.0430	0.0485	0.0410	0.0490
4.0	0.0480	0.0460	0.0440	0.0350	0.0480	0.0460	0.0440	0.0350	0.0350	0.0475	0.0360	0.0480
5.0	0.0470	0.0430	0.0350	0.0310	0.0470	0.0430	0.0350	0.0310	0.0310	0.0450	0.0330	0.0460
6.0	0.0450	0.0350	0.0320	0.0300	0.0450	0.0350	0.0320	0.0300	0.0300	0.0400	0.0310	0.0420
8.0	0.0350	0.0320	0.0300	0.0290	0.0350	0.0320	0.0300	0.0290	0.0290	0.0350	0.0290	0.0360
10.0	0.0320	0.0305	0.0290	0.0285	0.0320	0.0305	0.0290	0.0285	0.0285	0.0320	0.0285	0.0320
15.0	0.0283	0.0283	0.0283	0.0280	0.0283	0.0283	0.0283	0.0280	0.0280	0.0280	0.0280	0.0280

Se definieron tres tipos de curva (M, C, H). Las curvas tipo M (Tabla 2) se caracterizan por 5 formulaciones distintas y tres escenarios: constante (M1); lineal (M2); potencial (M3); exponencial tipo 1 (M4); y exponencial tipo 2 (M5). La diferencia entre M3, M4 y M5 radica en la velocidad de decaimiento de la curva, más pronunciada para la M5 para enfatizar el efecto “aplastamiento” de la vegetación para calados medios y altos. Las curvas tipo C (Tabla 3) difieren de las anteriores en la forma de decaimiento, buscando resaltar el efecto “aplastamiento” para calados moderados (no siguen una ecuación). Finalmente, las curvas tipo H (Tabla 3) se basan en la hipótesis de que el comportamiento de la planta es diferente para calados crecientes que para los decrecientes. De este modo se definieron curvas de histéresis $h-n$ con una rama de bajada más pronunciada que la de subida, enfatizando el efecto “aplastamiento” durante el inicio de la avenida (incremento de caudal) y una recuperación más paulatina durante el final de la avenida (decremento de caudal). En la Figura 8, a modo de ejemplo, se pueden apreciar las diferencias entre algunas de las curvas (H-S2, M1-S1, M3-S1, M5-S3 y C1-S4).

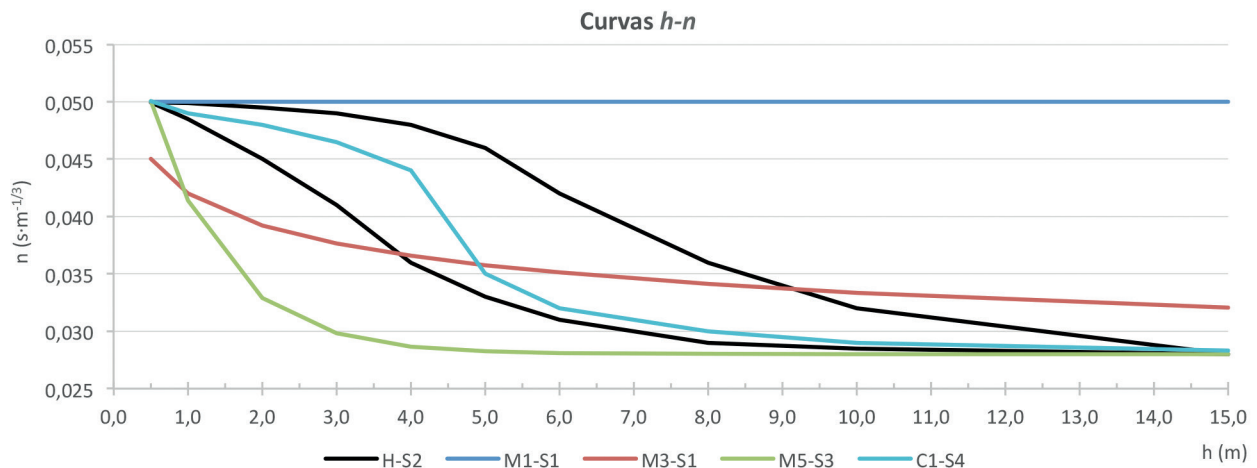


Figura 8 | Comparativa de diversas curvas $h-n$ donde se muestran, visualmente, las diferencias entre algunas de las distintas hipótesis estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones se compararon con los datos obtenidos durante la segunda campaña de campo a través del valor relativo del calado en los puntos de análisis (Figura 4a), tomando como “cero” las 01:00 h y con un caudal circulante de

600 m³/s. Estos valores se emplearon para redefinir los parámetros de rugosidad de los macrófitos en un proceso iterativo a fin de calibrar el modelo numérico. En total se realizaron 77 simulaciones, combinación de los diferentes escenarios de rugosidad.

Hidráulicamente el tramo de río estudiado se comporta como un canal en régimen subcrítico salvo en el azud de la CNA. Para los máximos caudales simulados se produce la inundación de las llanuras aluviales en tres zonas: la margen izquierda antes de llegar al Pas de Barca de Flix, la margen derecha en el tramo recto entre los meandros de Flix y Ascó (bosques de ribera) y en la margen izquierda del inicio del meandro de Ascó (donde también se anegan las islas y barras que hay dentro del río).

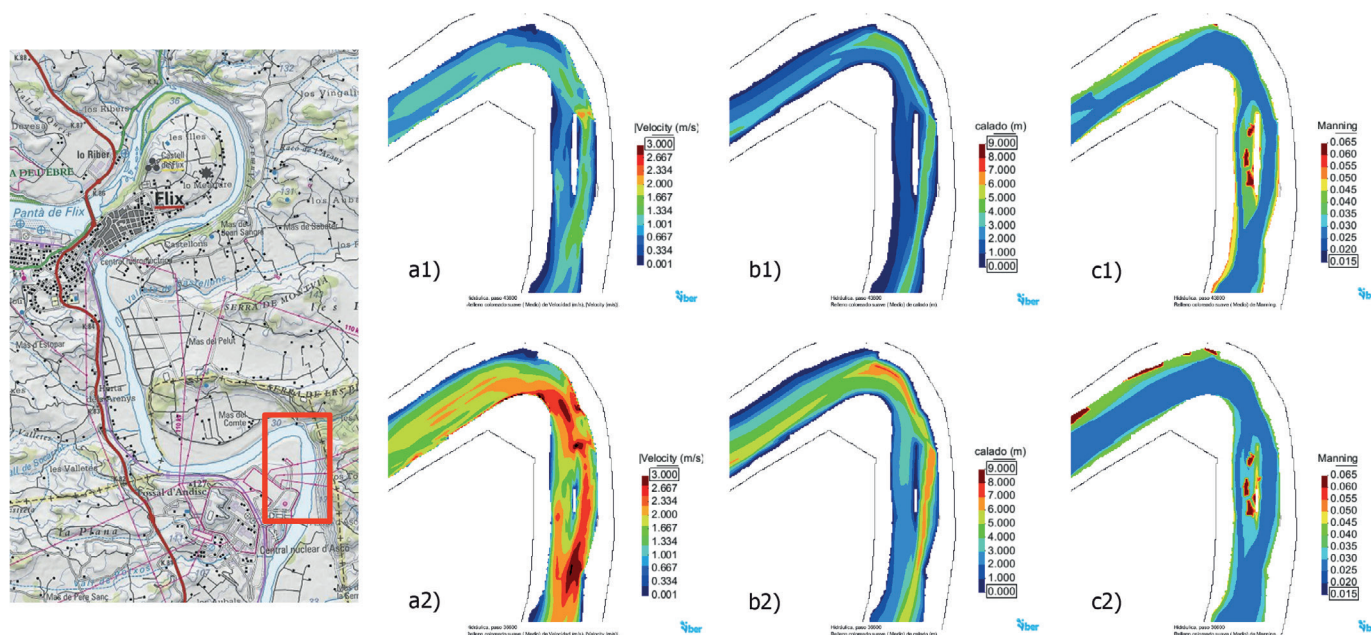


Figura 9 | Mapa de velocidades (a1 y a2) y de calados (b1 y b2) en el meandro de Ascó durante el periodo de aguas bajas (superior) y de aguas altas (inferior) en la hipótesis M3-S5. Para el mismo instante de tiempo se muestra el coeficiente de rugosidad (c1 y c2).

En cuanto al comportamiento hidráulico de los macrófitos, se puede observar que debido a su distribución espacial se produce un fenómeno de vía de intenso desagüe en aquellas zonas donde la rugosidad es menor, donde no hay macrófitos (Figura 9). Este efecto es más acusado cuanto menor es el flujo ya que el calado es menor y, por tanto, la resistencia al flujo es mayor, sobre todo donde existe presencia de macrófitos (Dawson y Robinson, 1984; Green, 2005a y 2005b; entre otros).

El análisis de los diferentes tipos de curva *h-n* fue realizado mediante la comparación de los datos de campo y del modelo numérico en los picos y valles, así como en las ramas de subida y bajada entre aguas altas y bajas.

Las curvas M no proporcionaron un ajuste adecuado para el rango de valores en los que oscila el calado en los puntos de medida (2.5 a 4.5 m), lo que provocó la sobrestimación del calado en aguas altas y bajas (diferencias entre +0.04 y +0.38 m respectivamente), así como la sobrestimación en las ramas de bajada para las M1 (+0.15 m) y la subestimación para el resto de las curvas tipo M (−0.18 m).

En las curvas tipo C se obtuvo un mejor ajuste en las ramas de subida (diferencias entre −0.11 y +0.25 m) y bajada (diferencias entre +0.05 y +0.20 m), sin embargo los picos del modelo numérico se adelantaron y los valles se retrasaron respecto a las medidas de campo (diferencias de sobrestimación entre +0.00 y +0.20 m).

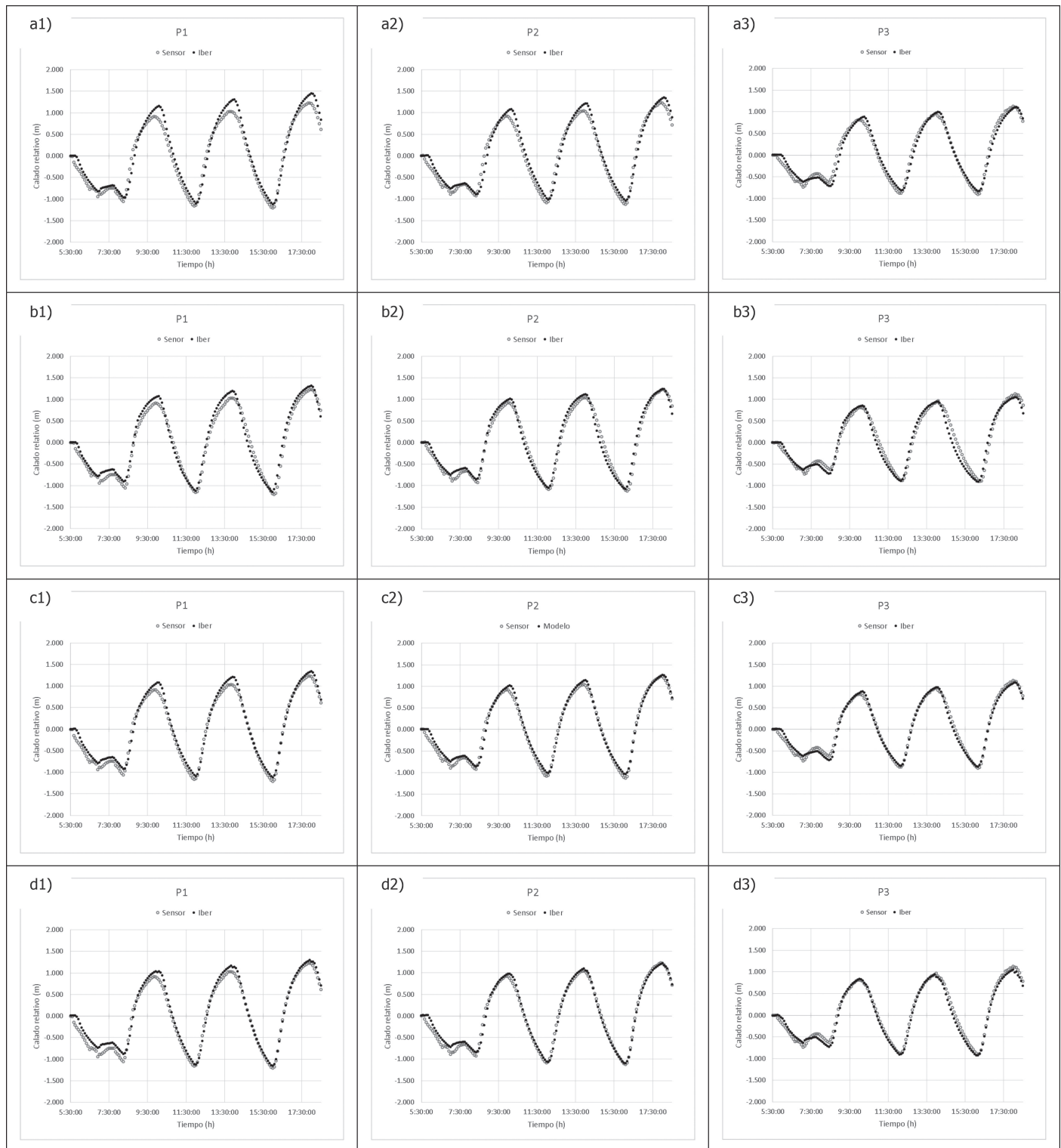


Figura 10 | Sondas de calado relativo. a) Escenario M1-S1; b) Escenario M5-S3; c) Escenario C1-S4; d) Escenario H-S2.

Las curvas tipo H presentaron el mejor ajuste de todas gracias a la consideración de fenómenos de histéresis. El diferente comportamiento de los macrófitos frente a calados crecientes o decrecientes (histéresis) fue mejor reproducido en los tres puntos, tanto en los picos y valles (diferencias entre -0.05 y $+0.12$ m), como en las partes intermedias (diferencias entre -0.07 y $+0.09$ m). El coeficiente R^2 para los tres puntos fue superior a 0.98 en las dos hipótesis de cálculo de las curvas tipo H.

En la Figura 10 se muestran, a modo de ejemplo, algunos resultados con diferentes tipologías de curva. En el punto 1 (Figura 4a) se aprecia cómo el modelo numérico se sitúa siempre por encima que los datos de campo (picos). Este fenómeno se puede atribuir a la limitación topográfica descrita anteriormente, que provoca la acumulación de agua debido a la falta de topografía en los contornos del modelo. En el resto de puntos también existe una tendencia a sobreestimar los calados pico, excepto en el último pico del punto 3 (Figura 4a). Este fenómeno puede deberse a la dificultad de controlar el caudal vertido desde la PF (sistema de compuertas) debido a que casi todo el volumen de la avenida controlada proviene de embalse de Ribarroja. Asimismo, el ajuste de las tres primeras horas del análisis (05:30 a 08:30 h) se evaluó en términos volumétricos y no comparando los calados, ya que existe gran incertidumbre en el hidrograma real vertido desde la PF y la CHF.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que el comportamiento hidráulico de los macrófitos, en el tramo de estudio, debe ser estudiado mediante curvas de rugosidad variable frente a las de rugosidad constante, ya que estas últimas sobreestiman el calado para valores altos de caudal. Asimismo, ni para valores constantes ni para valores variables (sin histéresis) de rugosidad se obtiene un buen ajuste en las ramas de decremento de caudal y en la forma del pico del hidrograma. Es por ello que se sugirió la implementación de curvas de histéresis calado-rugosidad, lo que ha proporcionado los mejores resultados. En los puntos evaluados estas curvas presentaron el mejor ajuste de todas las hipótesis ($R^2 > 0.98$) y, además, la hidrodinámica del tramo de río se reprodujo adecuadamente en todo su conjunto (zonas de flujo preferente para calados bajos).

El comportamiento histórico de la rugosidad de los macrófitos puede estar asociado tanto al propio porte de la planta como al flujo (histéresis velocidad-calado), por lo cual sería conveniente profundizar en el estudio de este aspecto a fin de obtener curvas particulares para cada tipo de formación de macrófitos, de composición y estructura distinta en función de las especies presentes y su estadio de desarrollo y evaluar con mayor precisión la interacción con el flujo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a ENDESA GENERACIÓN (UPH Ebro-Pirineos) el acceso a los datos de las avenidas controladas, a ENDESA S.A. (Cambio Climático, Biodiversidad, I+D+i ambiental y Recursos Hídricos) la financiación de la primera campaña de campo y los trabajos de modelización numérica (Instituto Flumen, 2016), al Grupo Especial de Actividades Subacuáticas de la Guardia Civil su colaboración en la primera campaña de campo y al Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial RIUS (Universidad de Lleida) los datos batimétricos y topográficos facilitados.

REFERENCIAS

- Arcement, G. J. J., Schneider, V. R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Floodplains. *USGS Water-supply Paper* 2339.
- Anderson, L. W. J. 2003. A review of aquatic weed biology and management research conducted by the United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service. *Pest Management Science*, 59, 801-813. <https://doi.org/10.1002/ps.725>
- Batalla, R. J., Vericat, D. 2009. Hydrological and sediment transport dynamics of flushing flows: implications for management in large Mediterranean rivers. *River Research and Applications*, 25, 297-314. <https://doi.org/10.1002/rra.1160>

- Barnes, H. H. 1987. *Roughness Characteristics of Natural Channels*. USGS.
- Berger, C., Wells, S. 2008. Modeling the Effects of Macrophytes on Hydrodynamics. *J. Environ. Eng.*, 134(9), 778-788. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:9\(778\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:9(778))
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014a. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya), 30(1), 1-10.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G. 2014b. Modelización numérica de inundaciones. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 71-82. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Carr, G. M., Duthie, H. C., Taylor, W. D. 1997. Models of aquatic plant productivity: a review of the factors that influence growth. *Aquatic Botany*, 59, 195-215. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(97\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(97)00071-5)
- Cirujano, S., Meco, A., Cezón, K. 2011. *Flora acuática: Macrófitos. Jornada de presentación del Tesoro Taxonómico para la clasificación del estado ecológico de las masas de agua continentales, TAXAGUA*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, España.
- CHE. 2008. *Vuelo multiespectral para la caracterización de macrófitos*. Confederación Hidrográfica del Ebro, expediente 173/08-SNS.
- CHE. 2010. *Asistencia técnica para el control de macrófitos: Mejora de la gestión de los embalses del Bajo Ebro*. Entidades colaboradoras: URS, ENDESA, Universidad de Girona y Universitat de Lleida. Zaragoza. 145 pp.
- CHE. 2015. *Memoria Anual 2015 de la Confederación Hidrográfica del Ebro*. Ministerio de Agricultura. Alimentación y Medio Ambiente. Centro de Publicaciones (NIPO: 284160028).
- Dawson, F. H., Robinson, W. N. 1984. Submerged macrophytes and the hydraulic roughness of a lowland chalkstream. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22, 1944-1948. <https://doi.org/10.1080/03680770.1983.11897598>
- ENDESA. 2016. *Estudi granulomètric del tram aigües avall de la Central Hidroelèctrica de Flix*. Informe técnico inédito (Eccus, S.L.). Febrero 2016, Lleida, España.
- Fathi-Moghadam, M., Kashefipour, M., Ebrahimi, N., Emamgholizadeh, S. 2011. Physical and Numerical Modeling of Submerged Vegetation Roughness in Rivers and Flood Plains. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(11), 858-864. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000381](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000381)
- Fathi-Moghadam, M., Drikvandi, K. 2012. Manning Roughness Coefficient for Rivers and Flood Plains with Non-Submerged Vegetation. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1), 1-4. <https://doi.org/10.5923/j.ijhe.20120101.01>
- Green, J. C. 2005a. Further comment on drag and reconfiguration of macrophytes. *Freshwater Biology*, 50, 2162-2166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01470.x>
- Green, J. C. 2005b. Modelling flow resistance in vegetated streams: review and development of new theory. *Hydrological Processes*, 19, 1245-1259. <https://doi.org/10.1002/hyp.5564>
- Green, J. C. 2006. Effect of macrophyte spatial variability on channel resistance. *Advances in Water Resources*, 29(3), 426-438. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.05.010>
- Hui, E., Hu, X. 2010. A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. *Journal of Hydrodynamics*. 22(3), 329-337. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60062-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60062-7)
- Instituto Flumen. 2016. *Estudio en Modelo numérico de la capacidad erosiva del río Ebro en el tramo Flix-Ascó*. Informe técnico inédito (Insituto Flume). Abril 2016, Barcelona, España.
- Järvelä, J. 2002. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. *Journal of Hydrology*, 269(1-2) 44-54. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00193-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00193-2)

- Järvelä, J. 2005. Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance. *Journal of Hydrology*, 307(1-4), 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.013>
- Montesinos, S., Fernández, L. 2009. Determinación de macrófitos en el río Ebro entre Flix y Mora d'Ebre. Teledetección. Agua y Desarrollo Sostenible. *Actas del XIII Congreso de Asociación Española de Teledetección*, Calatayud, 137-140.
- Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G., Reid, M. 2008. Hydraulic Resistance due to Aquatic Vegetation in Small Streams: Field Study. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(9), 1326-1332 [Technical note]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:9\(1326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1326))
- Palau, A., Batalla, R.J., Rosico, E., Meseguer, A., Vericat, D. 2004. Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-Roja reservoir (lower Ebro River. NE Spain). *HYDRO 2004—A New Era for Hydropower*, Porto, Portugal. 18-20 October 2004.
- Prats, J., Dolz, J., Armengol, J. 2009. Variabilidad temporal en el comportamiento hidráulico del curso inferior del río Ebro. *Ingeniería del Agua*. 16(4), 259-272. <https://doi.org/10.4995/ia.2009.2960>
- Stephan, U., Gutknecht, D. 2002. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydrology*, 269, 27-43. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00192-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00192-0)
- Strickler, A. 1923. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahl für Ströme. Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft. Bern. 1923.
- Tena, A., Ksiazek, L., Vericat, D., Batalla, R. J., 2013. Assessing the geomorphic effects of flushing flow in large regulated river. *River Research and Applications* 29: 876-890. <https://doi.org/10.1002/rra.2572>
- Vericat, D., Batalla, R. J. 2004. Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Rev. C. & G.*, 18(1-2), 37-50.
- Wu, F., Shen, H., Chou, Y. 1999. Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation. *J. Hydraul. Eng.*, 125(9), 934-942. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:9\(934\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:9(934))